

Impact des réglementations européennes des cycles de conduite normalisés sur la consommation des véhicules électriques

Florian Tournez, Walter Lhomme, Alain Bouscayrol, Betty Lemaire Semail,
Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille,
Yncrea Hauts-de-France, ULR 2697 - L2EP, F-59000 Lille, France

RESUME – Aujourd’hui, pour faire face au réchauffement climatique et minimiser l’impact des Gaz à Effet de Serre (GES), de nouvelles réglementations européennes plus strictes apparaissent. Dans le domaine automobile, elles concernent notamment les cycles normalisés de conduite pour les tests de véhicule sur banc à rouleau. L’objectif de cet article est de montrer l’impact énergétique de la réglementation européenne 2018/1832 concernant la procédure WLTP (procédure d’essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers) au travers de simulations énergétiques. L’une des réglementations impose une vitesse qui doit être comprise dans une plage de variation de plus ou moins 2 km/h par rapport à la vitesse de référence du cycle WLTC classe 3. Cette plage de variation de vitesse a pour conséquence d’impacter en moyenne 1,61 % la consommation du véhicule électrique. Les simulations ont été réalisées en utilisant le formalisme REM (Représentation Énergétique Macroscopique) appliqué sur la Renault ZOE.

Mots-clés - Véhicule électrique, Représentation Énergétique Macroscopique, Gestion d’énergie

1. INTRODUCTION

Aujourd’hui, des normes de plus en plus strictes font leur apparition pour limiter le réchauffement climatique et les émissions de GES. A lui seul, le secteur des transports représente 24,6% des émissions de GES en Europe [1]. L’Europe a fait le pari de réduire ses émissions de GES de 90% d’ici 2050 grâce au pacte vert pour l’Europe (Green Deal) [2]. La procédure d’essai mondiale harmonisée pour les voitures particulières et véhicules utilitaires légers (WLTP) permet d’évaluer la consommation des véhicules. Mise en place en 2017, pour mieux répondre au besoin actuel dans la fiabilité et la qualité de la reproduction de conditions réelles de conduite [3]. Depuis janvier 2019, les constructeurs automobiles ont l’obligation d’afficher les résultats obtenus avec cette réglementation.

L’objectif de cet article est de quantifier les écarts énergétiques entraînés lors des tests sur banc à rouleau avec la procédure WLTP (directive 2.6 : Procédure) [3]-[4]. La réglementation autorise une variation de vitesse de plus ou moins 2 km/h par rapport à la vitesse de référence du cycle. Cette tolérance permet de palier l’écart du conducteur survenant lors des essais réels. Tous les écarts en dehors de la plage doivent être alors consignés dans le rapport des essais. Ces dépassements (non traités ici) et cette plage de variation engendrent un impact sur la consommation énergétique des véhicules thermique ou électri-

fié. Sachant que l’autonomie des véhicules tout électrique est directement liée à la quantité d’énergie stockée dans la batterie [5]. Estimer au mieux les besoins énergétiques du véhicule électrique lors des essais réels est primordial.

La section 2 traitera de la modélisation et de la commande du véhicule avec le formalisme REM (Représentation Énergétique Macroscopique) [8]. L’observation et l’affichage des écarts sur la consommation seront ensuite présentés dans la section 3.

2. REM ET COMMANDE DU VEHICULE

2.1. Présentation du véhicule

Le véhicule étudié est la Renault ZOE. C’est un véhicule tout électrique à batterie (Figure 1). Ses principales caractéristiques techniques sont une machine synchrone à rotor bobiné de 66 kW, une batterie Lithium-ion de 26 kWh avec une tension nominale de 360V.

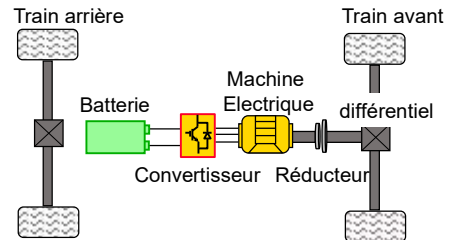


Figure 1: Schéma structurel de la Nissan Leaf

Les principaux paramètres utilisés lors des simulations du véhicule sont visibles dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristique de la Renault Zoe

Variable	Signification	Valeurs	Unité
M_{veh}	Masse du véhicule + 1 passager	1480	kg
K_{trans}	Ratio du réducteur	9.34	/
R_{roue}	Rayon de la roue	0.28	m
K_{roul}	Frottement au sol	0.0140	/
$s.Cx$	Coefficient de trainée	0.75	m ²
N_s	Nombre de cellules en serie par module	8	/
N_{mod}	Nombre de modules en série dans la batterie	12	/

N_p	Nombre de modules en parallèle dans la batterie	2	/
R_{cell}	Valeur de la résistance série	0.0012	Ω
C_{bat}	Capacité d'une cellule de la batterie	36	A.h
SOC_{init}	Etat de charge initial de la batterie	100	%
g	Pesanteur terrestre	9.81	m.s ⁻²
α	Amplitude de la pente	0	Degré (°)
η_{me}	Rendement global de la machine électrique	0.97	/
η_{trans}	Rendement global de la transmission mécanique	0.95	/

2.2. Modélisation du véhicule

Le modèle utilisé pour les simulations a été préalablement organisé avec l'outil REM (Figure 2) et validé sur un véhicule réel [7]. La REM est un formalisme graphique pour la représentation synthétique de systèmes énergétiques multidisciplinaires comme un véhicule électrique [8]. L'un de ces avantages est de pouvoir en déduire systématiquement une structure de commande.

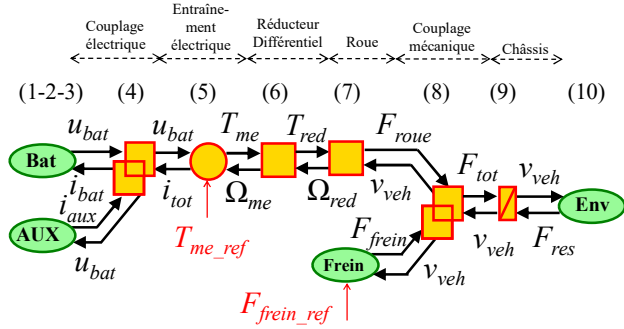


Figure 2. Modélisation du véhicule

Les éléments constituant le modèle du véhicule sont les suivants : une batterie de 26 kWh, les consommateurs auxiliaires qui sont principalement le chauffage de l'habitacle et l'éclairage, un couplage électrique entre la batterie, l'entraînement électrique (machine électrique et convertisseur), ici l'entraînement électrique est représenté par un modèle statique, le réducteur et le différentiel mécanique, un modèle de roue équivalente (modèle de la bicyclette), le couplage mécanique entre la roue et les freins du véhicule, le châssis et pour finir l'environnement du véhicule représentant les forces résistantes à l'avancement. Les différents paragraphes suivants détaillent les différentes équations des éléments.

- La batterie est modélisée par un modèle simple de cellule. Il est supposé un comportement identique des autres cellules dans la batterie. La tension et le courant de la batterie sont ainsi déterminés par le nombre de cellules composant celle-ci (eq. 1). Le modèle est composé d'une source tension (ocv) et d'une résistance en série (surtension ohmique) (eq. 2). La tension en circuit ouvert (ocv) de la cellule dépend directement de l'état de charge de la batterie (SoC). L'état de charge est déterminé par l'intégrale du courant traversant une cellule (eq. 3).

$$i_{cell} = \frac{i_{bat}}{N_p} \text{ et } u_{cell} = \frac{u_{bat}}{N_s} \quad (1)$$

$$u_{bat} = ocv - r_{cell} \cdot i_{cell} \quad (2)$$

$$SoC_{cell} = \int_0^t \frac{i_{cell}}{3600 \cdot C_{bat}} dt - \frac{SoC_{init}}{100} \quad (3)$$

- Le couplage électrique permet de déduire le courant de la batterie à partir du courant demandé par la traction et les auxiliaires (eq. 4).

$$i_{tot} = i_{bat} + i_{aux} \quad (4)$$

- L'entraînement électrique est modélisé par un modèle statique avec un rendement constant (eq. 5) car une étude énergétique est réalisée. Les dynamiques rapides de la machine électrique ne sont donc pas importantes pour cette étude [11].

$$i_{me} = \frac{\Omega_{me} \cdot T_{me}}{U_{bat} \cdot \eta_{me} \cdot x_{me}} \quad (5)$$

$$\text{avec } \begin{cases} x_{me} = 1 & \text{si } T_{me} \geq 0 \\ x_{me} = -1 & \text{si } T_{me} < 0 \end{cases}$$

- Le véhicule est équipé d'un réducteur et d'un différentiel mécanique permettant de démultiplier le couple de la machine électrique. Il est donc possible de déduire un coefficient équivalent K_{trans} (eq. 6) avec un rendement global de transmission η_{trans} .

$$\begin{cases} T_{red} = K_{trans} \cdot T_{me} \cdot \eta_{trans}^{x_{trans}} \\ \Omega_{me} = K_{trans} \cdot \Omega_{red} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{avec } \begin{cases} x_{trans} = 1 & \text{si } T_{red} \geq 0 \\ x_{trans} = -1 & \text{si } T_{red} < 0 \end{cases}$$

- La force à la roue est directement obtenue grâce au rayon du pneu (eq. 7).

$$\begin{cases} F_{roue} = \frac{T_{red}}{r_{roue}} \\ \Omega_{red} = \frac{v_{veh}}{r_{roue}} \end{cases} \quad (7)$$

- Un couplage mécanique apparaît entre les freins et la roue pour déterminer la force totale de traction (eq. 8).

$$F_{tot} = F_{frein} + F_{roue} \quad (8)$$

- La vitesse du véhicule est déterminée par la Seconde Loi de Newton (eq. 9).

$$M_{veh} \frac{dv_{veh}}{dt} = F_{tot} - F_{res} \quad (9)$$

- Pour finir, l'environnement du véhicule comprend les trois différentes forces de résistance à l'avancement. Les forces sont : la force de résistance au roulement (F_{roul}), la force engendrée par la pente (F_{pente}) et la force de résistance aérodynamique (F_{aero}).

La somme de ces trois forces donne la force totale résistante (F_{res}) (eq. 10).

$$\begin{cases} F_{res} = F_{aero} + F_{pente} + F_{roul} \\ F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot C_x \cdot (V_{veh} + V_{vent})^2 \\ F_{pente} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \\ F_{roul} = K_{roul} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (10)$$

2.3. Commande du véhicule

La commande du véhicule est obtenue par effet miroir du modèle [6]. L'inversion du châssis nécessite l'utilisation d'un correcteur $C(t)$ (eq. 11). La commande laisse apparaître grâce aux propriétés de la REM une entrée de réglage F_{frein_ref} au niveau de l'inversion du couplage des freins (eq. 12). L'entrée de réglage devra être gérée via la stratégie du véhicule. La roue et la transmission sont directement inversées et permettent de calculer le couple de référence de la machine électrique (eq. 13, 14). Les équations sont disponibles ci-dessous :

$$F_{tot_ref} = (v_{veh_ref} - v_{veh_mes}) \cdot C(t) + F_{res_mes} \quad (11)$$

$$\begin{cases} F_{roue_ref} = F_{tot_ref} - F_{frein_strat} \\ F_{frein_ref} = F_{frein_strat} \end{cases} \quad (12)$$

$$T_{red_ref} = R_{roue} \cdot F_{roue_ref} \quad (13)$$

$$T_{me_ref} = \frac{1}{K_{trans}} \cdot T_{red_ref} \quad (14)$$

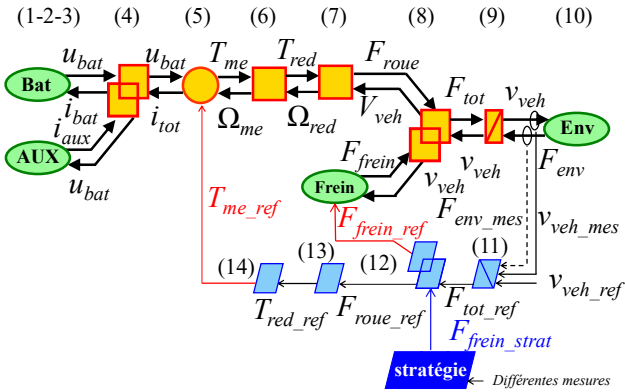


Figure 3 : REM et commande du véhicule

2.4. Stratégie de gestion de l'énergie

La stratégie de gestion d'énergie permet de gérer l'entrée de réglage du couplage des freins (F_{frein_ref}) obtenue par l'inversion du modèle. Cette entrée permet de définir le type de freinage qui sera utilisé par le véhicule. Le freinage peut être de trois natures différentes : mécanique, électrique et hybride. Les différents modes sont obtenus grâce à une stratégie à base de règles. La stratégie est donnée par l'organigramme en Figure 4.

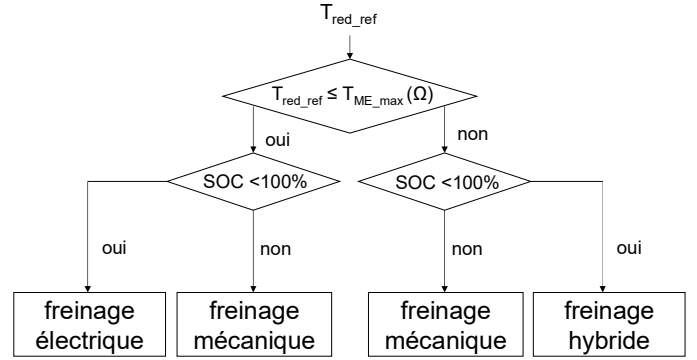


Figure 4: Organigramme de la stratégie de freinage

La première condition est liée à la valeur du couple maximal autorisé par la machine électrique en fonction de sa vitesse de rotation. Si le couple total de référence (T_{red_ref}) est plus faible ou égale au couple admissible par la machine électrique alors on se situe dans la branche de gauche de l'organigramme.

La deuxième condition importante est l'état de charge de la batterie. Si l'état de charge de la batterie est plus petit que 100% alors le freinage sera de type électrique (eq. 15).

$$\begin{cases} F_{frein_strat} = 0 \\ F_{roue_ref} = F_{tot_ref} \end{cases} \quad (15)$$

Si la récupération d'énergie n'est pas envisageable le freinage sera de type purement mécanique pour dissiper toute l'énergie sous forme de chaleur (eq. 16).

$$\begin{cases} F_{frein_strat} = F_{tot_ref} \\ F_{roue_ref} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Si le couple total de référence (T_{red_ref}) est plus grand que le couple admissible par la machine électrique alors on se situe dans la branche de droite de l'organigramme. Si l'état de charge de la batterie est de 100 %, le freinage est mécanique (eq. 16). A l'inverse si l'état de charge est plus faible alors le freinage sera de type hybride (mécanique et électrique) (eq 17).

$$\begin{cases} F_{frein_strat} = F_{tot_ref} - F_{ME_max} \\ F_{roue_ref} = F_{ME_max} \end{cases} \quad (17)$$

3. IMPACT ÉNERGETIQUE DE LA RÉGLEMENTATION

L'objectif de cette partie est d'observer l'impact énergétique de la réglementation européenne sur la consommation énergétique du véhicule électrique. La réglementation autorise lors des essais sur banc à rouleau de se trouver dans une plage de variation de $\pm 2\text{km/h}$ par rapport au cycle de référence (WLTC). L'étude se base sur deux scénarios de simulation qui sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.1. Scénario de simulation n°1

Le premier scénario est le suivant : le freinage est purement mécanique (pas de récupération d'énergie) et une consommation nulle pour les auxiliaires. Les résultats de simulation sont présentés pour le cycle WLTC de classe 3. Il est décomposé en quatre zones distinctes : le centre-ville (0 s à 589 s), la zone urbaine (589 s à 1022 s), la zone périurbaine (1022 s à 1477 s) et l'autoroute (1477 s à 1800 s). Cela représente 57% du trajet en

zone urbaine, 25% en zone périurbaine et 10% sur autoroute. Il est pris pour hypothèse des conducteurs idéaux qui pourront suivre parfaitement le profil de vitesse considérée. Les simulations ont été réalisées selon les trois conditions suivantes : la vitesse respecte le cycle, la vitesse est inférieure à moins 2 km/h et la vitesse est supérieure à plus 2 km/h par rapport au cycle de référence. Les trois courbes de vitesse sont visibles sur la Figure 5.

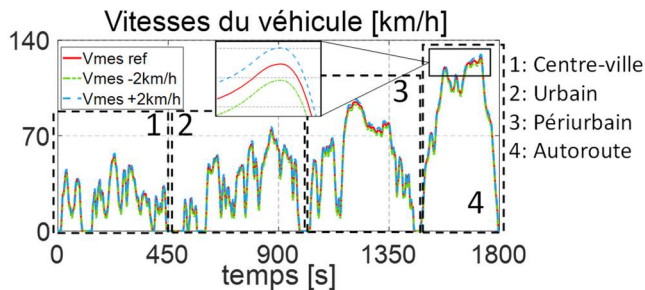


Figure 5: Les différentes vitesses obtenues

La Figure 6 récapitule la consommation énergétique du véhicule par zone au 100 km. La consommation est calculée en fonction de la tension et du courant de la batterie.

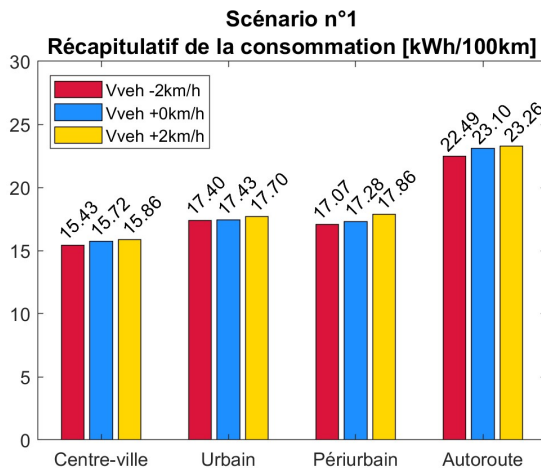


Figure 6. Scénario n°1 - Récapitulatif de la consommation

On peut constater que la consommation d'énergie par zone varie très légèrement en fonction de la plage de variation de la réglementation. Cette légère variation est due à des vitesses et des accélérations différentes. Le second point est la consommation énergétique selon les différentes zones de conduites. Par exemple entre le centre-ville et le trajet extra-périurbain (autoroute) un facteur multiplicateur de 1,50 apparait sur la consommation. Cette augmentation est due à la force aérodynamique qui est multipliée par le carré de la vitesse (eq. 10).

La Figure 7 montre les écarts absolus de consommation entre les différentes zones par rapport à la réglementation. Elle n'impacte que très légèrement la consommation comme le montre le graphique à barres. L'écart global moyen sur l'autonomie du véhicule est de 1,55%. Il est intéressant d'observer maintenant l'influence de ce paramètre sur l'autonomie globale du véhicule.

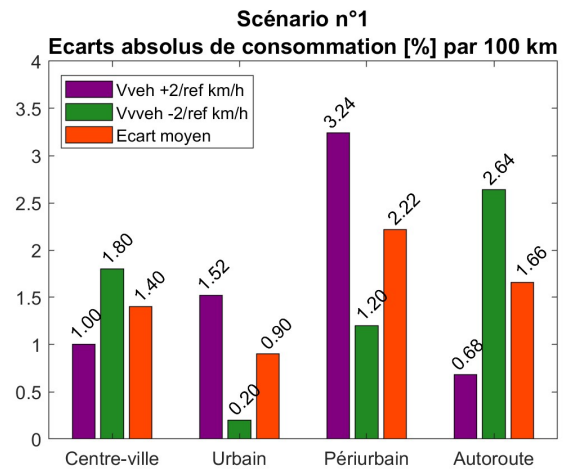


Figure 7. Scénario n°1 - Ecart de consommation entre les zones

La Figure 8 montre l'autonomie du véhicule dans les deux cas extrêmes. Comme vu précédemment, les trajets urbains favorisent en ville l'autonomie du véhicule électrique à l'instar de l'autoroute. L'autonomie pourra s'étendre de 110 km à 167 km selon le type de parcours réalisé par le conducteur pour une batterie de 26 kWh. En moyenne, le véhicule va parcourir 165 km en ville et 112 km sur autoroute. En prenant en compte l'erreur moyenne engendrée par la réglementation européenne, l'autonomie du véhicule calculée lors de l'essai sur banc à rouleau sera très peu affectée avec une erreur moyenne de ± 2 km.

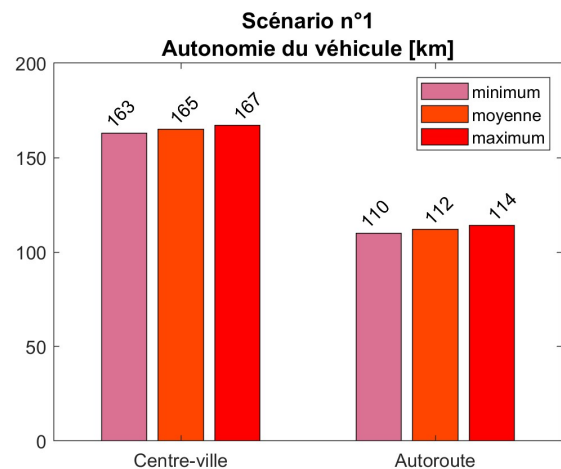


Figure 8. Scénario n°1 - Autonomie du véhicule

Le scénario n°1 ignorait le freinage régénératif du véhicule sur le cycle WLTC. La seconde partie permettra d'observer si le freinage régénératif a un impact sur l'autonomie du véhicule en prenant en compte la réglementation.

3.2. Scénario de simulation n°2

Le second scénario est le suivant : le freinage régénératif est actif et une consommation nulle pour les auxiliaires. Le freinage est géré par le biais de la stratégie Figure 4. Le but est d'observer si le freinage a un quelconque impact sur la consommation du

véhicule. La Figure 9 récapitule la consommation sur les différentes zones sur cycle.

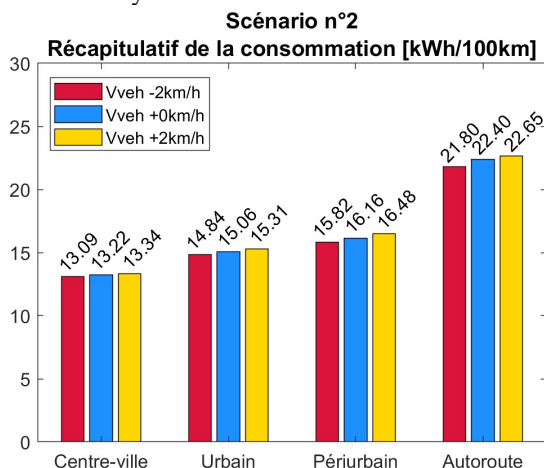


Figure 9. Scénario n°2 - Récapitulatif de la consommation

Le freinage vient réduire de façon globale la consommation du véhicule, ce qui est parfaitement logique puisque l'énergie récupérée par le freinage régénératif vient recharger la batterie du véhicule. Les mêmes conclusions que dans le scénario n°1 apparaissent. La Figure 10 montre les différents écarts de consommation.

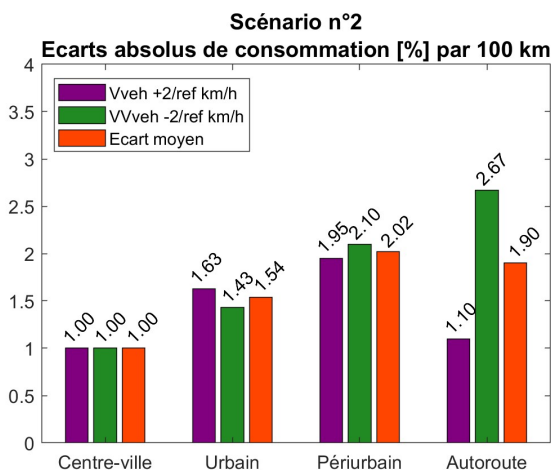


Figure 10. - Scénario n°2 - Ecart de consommation entre les zones

Le freinage régénératif n'a pas d'impact majeur sur la réglementation européenne par rapport à la consommation énergétique du véhicule puisque les écarts absolus sont du même ordre de grandeur que la Figure 7. La réglementation a donc le même effet sur un véhicule équipé ou non de freinage régénératif.

Cette fois-ci, l'écart moyen global est de 1,61% (1,55% sans freinage). La Figure 11 montre alors les différentes nouvelles autonomies moyennes du véhicule. Grâce au freinage régénératif, l'autonomie du véhicule va augmenter de 4 km à 31 km maximum selon le type de trajet réalisé par le conducteur.

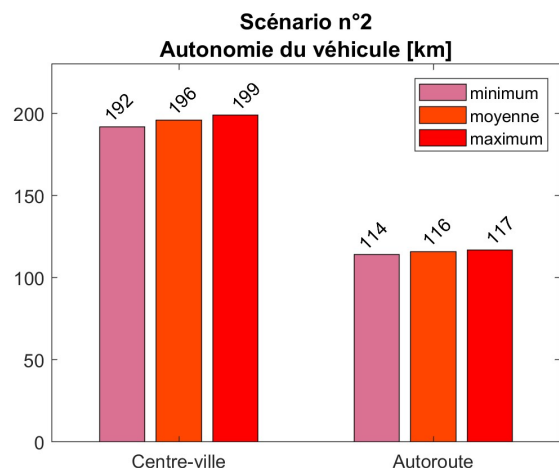


Figure 11. Scénario n°2 - Autonomie du véhicule

L'autonomie du véhicule peut être calculé de la manière que précédemment. Avec le freinage régénératif, une erreur sur banc à rouleau d'environ ± 3 km sera réalisé.

4. CONCLUSION

La réglementation européenne définit le test de véhicule sur banc à rouleau avec une incertitude acceptée de ± 2 km/h. L'effet sur la consommation énergétique de la Renault ZOE a été présenté pour deux scénarios. Un premier scénario où le freinage est purement mécanique et un second scénario avec un freinage régénératif.

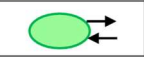
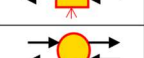
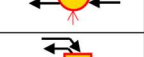
Une erreur globale moyenne d'environ 1,61% pourra apparaître sur la consommation énergétique du véhicule lors des essais sur banc à rouleau. Puisque dans la réalité, le conducteur va osciller dans la plage de variation autorisée par la réglementation lors des essais réels. Cet écart se traduit par une erreur sur l'autonomie annoncé d'environ ± 3 km en moyenne. La réglementation européenne n'impacte donc pas la consommation énergétique du véhicule lors des essais sur banc à rouleau et est donc négligeable si elle est correctement respectée.

5. REFERENCES

- [1] Statistic Pocket Book, (2018). *EU transport in figures* [version pdf]. Consulté le 09/01/2020 - https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2019_en
- [2] Commission Européenne, (2019). *Mobilité Durable - le pacte vert pour l'Europe* [version pdf]. Consulté le 09/01/2020 - https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/fs_19_6726
- [3] Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., & Steven, H. (2015). Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation research part D: transport and environment*, 40, 61-75.
- [4] Official Journal of The European Union, (2018). *Commission de Régulation (EU) 2018/1832 of 5 November 2018* [version pdf]. Consulté le 07/01/2020 - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1832&from=FR>
- [5] Miller, J. M. (2018). *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles* [Book Review]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 5(4), 86-87.

- [6] A. Bouscayrol, J. P. Hautier, B. Lemaire-Semail, "Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic Systems", *Systemic Design Methodologies for Electrical Energy, tome 1, Analysis, Synthesis and*
- [7] Desreux, A., Bouscayrol, A., Trigui, R., Castex, E., & Klein, J. (2019). Impact of the Velocity Profile on Energy Consumption of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(12), 11420-11426.
- [8] *Management, Chapter 3*, ISTE Willey editions, October 2012, ISBN: 9781848213883
- [9] United States Environmental Protection Agency. *Data on Cars used for Testing Fuel Economy - 2018 Test Car List Data (XLSX)*. Consulté le 11/05/2020 [version excel] - <https://www.epa.gov/compliance-and-fuel-economy-data/data-cars-used-testing-fuel-economy>
- [10] De Gennaro, M., Paffumi, E., Martini, G., Manfredi, U., Scholz, H., Lacher & Simic, D. (2014). Experimental investigation of the energy efficiency of an electric vehicle in different driving conditions (No. 2014-01-1817). SAE Technical Paper.
- [11] Letrouve, T., Bouscayrol, A., Lhomme, W., Dollinger, N. et Calvairac, F. M. (2010). Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation. Communication présentée au 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, France (p. 1-6). doi:10.1109/VPPC.2010.5729209

Appendix

	Energy management Strategy	
	Source of Energy	
		Accumulation Element (yellow) And the corresponding closed-loop control (blue)
		Mono and Multi physical converters (yellow) And the corresponding open-loop control (blue)
		
		Mono and Multi physical coupling device (yellow) And the corresponding open-loop control (blue)
